УДК 621.181

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В КОТЛАХ

А.С. Заворин, Ю.Я. Раков

Томский политехнический университет
E-mail: ghost@tpu.ru

В соответствии с существующей классификацией наружных загрязнений поверхностей нагрева котлов систематизированы представления, необходимые для составления физических моделей процессов и для обоснования натурных и лабораторных экспериментов. Выделена роль теплофизических свойств и, в частности, теплопроводности, в эволюции слоевой структуры, показаны основные физические и химические факторы, определяющие развитие отложений.

Введение

Процессы в паровых котлах, определяемые свойствами минеральной части топлива, остаются актуальными для исследований, поскольку на длительную перспективу основу энергетики составляют угольные тепловые электрические станции. В отечественной науке продвижение в этой проблематике осуществлялось исследовательскими коллективами Всероссийского теплотехнического института, его Уральского и Сибирского филиалов, Института химии твердого тела и минерального сырья СО РАН, подразделений "Союзтехэнерго", Томского политехнического и Красноярского государственного технического университетов. Значительное влияние на развитие работ в СССР оказали научные школы Таллинского технического университета и Казахского НИИ энергетики. Многие аспекты проблемы были подробно исследованы и освещены в известных трудах [1–9 и др.].

Современное состояние проблемы характеризуется, с одной стороны, довольно глубоким проникновением в существо происходящих явлений и пониманием механизма в целом, с другой стороны, утверждением представлений о многообразии факторов, влияющих на загрязнение поверхностей нагрева, а в итоге – о большой сложности процессов. Последнее выражается в разнообразии типов натрубных отложений, которые могут при сжигании одного топлива различаться по составу, по структуре, по прочности, по теплофизическим характеристикам, по степени связанности с поверхностью трубы, по локализации на поверхностях нагрева и другим признакам. Усиление тех или иных признаков в конкретных условиях зависит от состава минеральной части топлива, целого ряда особенностей организации топочного процесса, температурного режима и скорости дымовых газов у поверхности нагрева, от ее конструктивных параметров.

Типы золовых отложений

В настоящее время наиболее употребляемой является классификация отложений, учитывающая как преобладающий механизм их образования, так и структуру и степень связывания [3, 6]. Согласно этой классификации отложения могут быть отнесены к одной из четырех групп: сыпучие, связанные, шлаковые, связанно-шлаковые.

Сыпучие отложения образованы из твердых частиц, механически скрепленных с поверхностью трубы и между собой. Связанные отложения сформированы из частиц, которые сцеплены между собой и с поверхностью трубы за счет спекания и химического взаимодействия. В зависимости от развития межчастичного сцепления связанные отложения разделяют на плотные и рыхлые. Шлаковые отложения образуются за счет наброса на поверхность нагрева частиц золы в расплавленном и пластичном состоянии. Этот процесс называется шлакованием. Характерным его признаком является отсутствие отличий по составу между шлаковыми отложениями и совокупностью частиц, транспортируемых дымовыми газами. Связанно-шлаковые отложения образуются за счет частиц, находящихся в различном агрегатном состоянии, в массиве которых могут развиваться процессы спекания и химического взаимодействия.

Образование отложений носит поэтапный характер во времени, согласно которому отложения подразделяют на первичные и вторичные. Первичные отложения образуются в области температур, ограниченной снизу наружной температурой незагрязненной трубы и сверху температурой омывающих дымовых газов. В зависимости от температуры стенки и других факторов первичные отложения развиваются при сочетании двух процессов: образования рыхлого напыления и процессов упрочнения в нем. Скорость последних зависит от содержания активных частиц, то есть способных к физико-химическим взаимодействиям, которые сопровождаются образованием прочных продуктов. В зависимости от этого стадия первичных отложений завершается образованием рыхлого либо плотного подслоя. В условиях периодического воздействия на поверхность нагрева штатных средств очистки наиболее легко удаляется рыхлая составляющая подслоя, соответственно в нем увеличивается концентрация активных частиц, и скорость упрочнения возрастает. С течением времени, как правило, формируется плотный подслой, в области контакта которого с поверхностью трубы выделяется (визуально и инструментальными средствами) особо плотная основа, сильно связанная с окисной пленкой металла. Такой характер развития первичных отложений определяет их слоистую структуру, которая в разных условиях может быть выражена в различной степени.

По мере увеличения толщины первичных отложений температура на их поверхности повышается и постепенно приближается к температуре омывающих дымовых газов. Если в потоке дымовых газов при этой температуре имеются частицы золы в расплавленном или пиропластическом состоянии, то за счет их адгезионного закрепления на первичных отложениях и последующего налипания на них твердых частиц развиваются вторичные отложения. Поскольку формирующие их частицы обладают повышенной способностью к закреплению в слое, вторичные отложения растут интенсивно, в отличие от медленно нарастающих первичных отложений. Вторичные отложения, развивающиеся по такому механизму, чаще всего классифицируются как связанно-шлаковые. В области высокой температуры газового тракта вторичные отложения являются преимущественно шлаковыми. Одновременно при термодинамически благоприятных условиях в слое вторичных отложений развиваются физико-химические процессы упрочнения.

Динамические стадии образования

Качественная картина стадий образования отложений в зависимости от температуры дымовых газов и поверхности трубы по схеме, предложенной А.Н. Алехновичем с соавторами [10], показана на рис. 1. Температура, при которой начинается рост вторичных отложений, называется температурой начала шлакования $T_{нш}$. Э.П. Дик [11] обосновал и ввел в экспериментальную практику определение $T_{нш}$ с помощью неохлаждаемых зондов, устанавливаемых в различных участках газового тракта для накопления отложений при известной температуре. Согласно этой методике принимается за температуру начала шлакования точка пересечения зависимости $q=f(T_г)$ с осью абсцисс (рис. 1, *а*). Это значение используется на практике как одна из важнейших характеристик свойств топлива и условий сжигания.

Изменение массы натрубных отложений в зависимости от скорости потока описано И.П. Эпиком и И.Р. Микком [2] в виде графика на рис. 2. При движении дымовых газов переносимые ими частицы в зависимости от плотности и размера обладают разной кинетической энергией и инерционностью движения. Вследствие этого наиболее крупные частицы не меняют своей траектории при входе в трубные пучки и при столкновении с трубой оказывают разрушающее действие на слой осевшей золы. Наиболее мелкие частицы, наоборот, самые безынерционные и потому легко следуют за отклоняющимися линиями тока набегающего на поверхность нагрева потока. Промежуточные по крупности и по плотности частицы осаждаются на поверхность трубы.

При малой скорости набегающего потока разрушающее действие золовых частиц проявляется слабо, происходит интенсивное осаждение золы, основная масса которой представлена нейтральными частицами (то есть такими, которые не меняют своих свойств в слое отложений с течением времени). Образующиеся отложения остаются рыхлыми длительное время, а в благоприятных условиях (при отсутствии активных частиц и упрочняющих факторов) являются сыпучими в продолжении всей рабочей кампании котла. Такие отложения легко удаляются штатными средствами очистки поверхностей нагрева котла и не требуют особой регламентации этих эксплуатационных операций.

По мере увеличения скорости потока разрушающее (изнашивающее) воздействие крупных и массивных частиц возрастает. Износ слоя отложений происходит в первую очередь за счет выбивания из него нейтральных золовых частиц. Это приводит к возрастанию в отложениях доли активных частиц, то есть таких, которые обладают способностью к взаимодействию с другими частицами, с компонентами дымовых газов и поверхностью трубы. В итоге отложения уплотняются и в них развиваются процессы связывания. Если скорость потока превысит некоторую величину $\omega_{кр1}$, то разрушающее действие ударяющих по слою частиц усиливается настолько, что в слое остаются только активные частицы, в результате чего отложения развиваются как связанные.

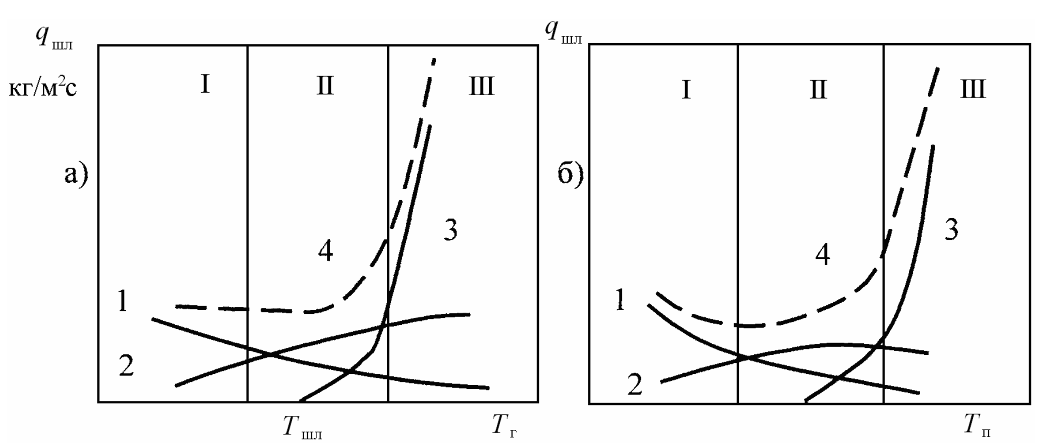


Рис. 1. *Стадии изменения удельной массовой скорости образования отложений в зависимости от температуры газов (а) и поверхности трубы (б) [10]: I, II) рыхлые и прочные первичные; III) вторичные; 1, 2, 3) скорость роста соответственно рыхлых и прочных первичных, вторичных; 4) суммарная скорость роста золовых отложений*

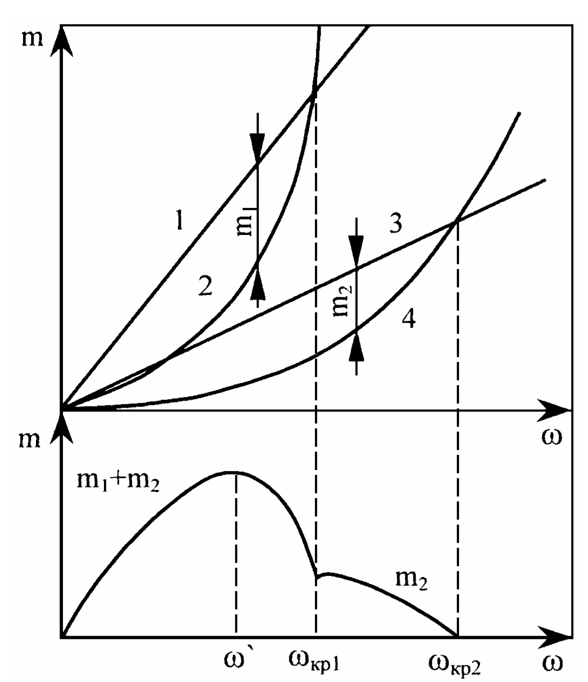


Рис. 2. *Графическая интерпретация зависимости массы m образующихся отложений на фронте трубы от скорости дымовых газов в пучке труб [2]: 1) осаждающейся нейтральной золы; 2) удаляемой (за счет износа) нейтральной золы; 3) осаждающейся активной золы; 4) удаляемой (за счет износа) активной золы; m_1 и m_2) масса отложений, сформированных соответственно из нейтральной и из активной золы*

При дальнейшем повышении скорости потока появляется и постепенно нарастает разрушение связанных отложений, интенсивность которого при достижении второй характерной величины $\omega_{кр2}$ превалирует над интенсивностью закрепления и связывания активных золовых частиц в слое. В случае очень высокой скорости потока $\omega>\omega_{кр2}$ разрушающее действие частиц золы настолько усиливается, что не образуются золовые отложения, а идет износ поверхности нагрева.

Представим себе, что поверхность нагрева взаимодействует с запыленным золой потоком в области высоких температур дымовых газов, например, на выходе из топки в конвективный газоход. Качественная картина образования отложений изменится тем, что будут участвовать частицы, находящиеся в расплавленном или пиропластическом состоянии. Такие частицы способны скрепляться между собой, с поверхностью трубы и слоя отложений, с твердыми частицами за счет сил адгезии. Последующая кристаллизация, на скорость которой влияет теплопроводность слоя, создает дополнительное связывающее и упрочняющее влияние. Таким образом, при наличии частично или полностью расплавленных частиц возрастает количество оседающей и закрепляющейся золы, а количество нейтральных частиц, которые могут быть выбиты из слоя в процессе золового износа, уменьшается, как и количество частиц, способных оказывать разрушающее действие на слой. Этим объясняется очень быстрое развитие такого типа отложений, относящихся к связанно-шлаковым, и меньшая зависимость этого процесса от скорости потока.

Итак, развитие натрубных отложений, независимо от их принадлежности к какой-либо классификационной группе, в самом общем виде можно представлять как совокупность процессов осаждения частиц на поверхности трубы и в покрывающем трубу слое, нарастания массы отложений, упрочнения образовавшегося массива. При этом типы отложений отличаются по степени наложения и интенсивности этих процессов.

Механизм вторичных отложений

Избирательность участия отдельных частиц в образовании отложений или ее отсутствие является важным признаком механизма процессов. Такие факторы как температура и скорость дымовых газов, температура стенки поверхности, характер расположения труб в пучке, фракционный состав летучей золы влияют на нее. Однако в еще большей мере она предопределяется наличием или отсутствием активных частиц, что в решающей мере зависит от исходного состава и свойств минеральной части угля.

На избирательной основе вторичные отложения, как следует из рассмотренного выше, могут развиваться по механизму рыхлых, слабо связанных, а также связанно-шлаковых отложений. Если не превалирует шлаковая составляющая, то вторичные отложения имеют форму гребней, вытянутых от фронтальной стороны трубы навстречу набегающему потоку. Величина гребней определяется как аэродинамическими факторами (условия достижения равновесия между осаждением частиц и износом слоя), так и физико-химическими (условия для развития упрочняющих процессов связывания). Последние в наибольшей мере проявляются в термодинамически благоприятной области температур и концентраций компонентов, а поскольку составляющие основу процессов связывания гетерогенные и гомогенные химические взаимодействия зависимы не только от кинетических, но и от диффузионных явлений, то и развитие связывания идет во времени с определенной скоростью. Если установить эту динамику, то можно подобрать и благоприятный режим эксплуатационной очистки поверхностей нагрева, и требуемое разрушающее усилие.

Поскольку процессы связывания зависят от температуры и концентрации активных компонентов, то скорость их и механизм видоизменяются по мере изменения толщины слоя. В отдельных случаях механизм связывания или его составляющие могут быть едиными как для первичных отложений, так и вторичных. Рассмотрение этих механизмов поэтому проведено ниже, при описании условий образования первичных отложений.

Наиболее интенсивно стадия роста протекает при образовании шлаковых отложений, однако даже в случае преобладания признаков других классификационных групп отложений наличие шлако-

вания только как составляющей процесса резко усиливает нарастание вторичных отложений.

Шлаковые отложения в чистом виде образуются, когда в высокотемпературной области газового тракта поверхность нагрева контактирует с потоком, в котором летучая зола находится в незатвердевшем состоянии, и растут интенсивно до тех пор, пока собственный вес отложений не превысит предела по условию механической прочности.

Наряду с упомянутой выше температурой начала шлакования другой характеристикой процесса принята интенсивность шлакования $q_{шл}$, которая представляет собой количество отложений, образовавшихся за единицу времени на единице поверхности, кг/(м^{2}с), рис. 1.

Взаимосвязь интенсивности шлакования поверхности нагрева с факторами этого процесса исследовалась М.И. Вдовенко с сотрудниками путем анализа энергетического баланса физических воздействий взвешенных в потоке частиц на поверхность и экспериментальным лабораторным испытанием выявленных параметров на модельном веществе [9]. Согласно этим исследованиям интенсивность шлакования определяется как режимными условиями (скорость потока, крупность частиц, их концентрация, температура), так и физическими свойствами золы (адгезия, вязкость, упругость, поверхностное натяжение, смачиваемость поверхности, плотность), которые зависят от состава и температуры.

Механизм первичных отложений

Поскольку вторичные отложения развиваются по достижению определенной температуры на поверхности предшествующих наслоений, эволюция первичных отложений связана с изменением эффективной теплопроводности, причиной чего может быть изменение состава и плотности. Эти изменения являются характерным признаком первичных отложений, трансформирующихся из первоначального слоя золы на трубах.

Возможность длительного существования натрубных загрязнений в виде первичных отложений, выявленная при исследованиях конвективных элементов ряда котлов на ирша-бородинском угле и на назаровском угле, привлекла внимание к изучению их специфики, в результате чего утвердилось представление о селективных механизмах формирования состава. Последние, в свою очередь, воспринимаются как проявления фракционных особенностей в термических свойствах минеральных компонентов угля.

Действительно, температура незагрязненной стенки трубы конвективных элементов, на которых образуются эти отложения, составляет от 400 до 600 °С, что значительно ниже стандартных показателей плавкости золы любого из углей. Вместе с тем наличие в угле минералогических систем с более низкими температурами плавления, чем основная масса золы, свидетельствует о вероятном вкладе в инициирование первичных отложений частиц, находящихся в момент контакта в расплавленном состоянии.

Механизм возникновения первичных отложений обычно объясняют исходя из преобладающих особенностей химического и минералогического составов уже сформировавшегося слоя. В рамках такого подхода выделяют: отложения, обогащенные щелочными оксидами, отложения с высокой концентрацией железа и отложения с высоким содержанием сульфата кальция.

В соответствии с этой градацией одной из причин первоначального загрязнения труб считается конденсация легко испаряющихся минеральных компонентов топлива [5, 12, 13]. Такими свойствами обладают соли натрия и калия, содержащиеся в углях. Под воздействием высокой температуры при горении топлива они диссоциируют и частично улетучиваются. Пары щелочей могут конденсироваться по ходу дымовых газов непосредственно на поверхности нагрева, создавая на ней липкую пленку, которая облегчает закрепление нейтральных частиц, либо конденсироваться в тепловом пограничном слое в виде мельчайших частиц аэрозоля, которые пополняют количество активных частиц в отложениях. Конденсация щелочей в потоке происходит также на быстрее охлаждающиеся мельчайшие золовые частицы. В этом случае на поверхности частиц образуются (как продукт взаимодействия) системы с низкой температурой плавления, что усиливает активность таких частиц к образованию отложений. Осевшие и закрепившиеся на поверхности нагрева системы сконденсировавшихся щелочных оксидов и гидроксидов взаимодействуют с оксидами серы дымовых газов и образуют разнообразные сульфаты, пиросульфаты и комплексные сульфаты, которые имеют низкую температуру плавления и поэтому усиливают слипаемость и спекаемость частиц в слое золы, вовлекая в процесс упрочнения нейтральные силикатные частицы. По мере увеличения толщины отложений и их термического сопротивления на внешней стороне слоя повышается температура, поэтому условия для конденсации паров щелочных соединений ухудшаются. Это приводит к тому, что определяющая роль в развитии отложений переходит к другому, термодинамически наиболее обусловленному, механизму золового загрязнения. Надо полагать, что по этим причинам обогащенные щелочными соединениями первичные отложения не достигают большой толщины, а на их основе образуются отложения, в которых связывание идет уже за счет других активных частиц.

Другой механизм образования первичных отложений выражается в накоплении соединений железа. Селективный по соединениям железа процесс образования отложений встречается при сжигании твердых топлив в разных регионах и с различными минералогическими формами вхождения железа в топливо [10, 14–19]. По-видимому, в некоторых ус-

ловиях превалирующее значение имеют параметры топочного процесса по сравнению с исходным состоянием железистых компонентов топлива. В частности, отмечается, что железистые плотные отложения возникают на топочных экранах в области высокой интенсивности излучения факела [6]. Это свидетельствует о закреплении частиц с фрагментами плавления. Примечательно, что существует довольно большое количество систем, в состав которых входит железо в низшей степени окисления и которые имеют сравнительно низкие температуры плавления. Данному процессу могут способствовать локальные неравномерности тепловой нагрузки, аэродинамическая структура факела, газовый состав топочной среды в пристенной области, режим действия средств очистки и величина механического усилия обдувающего агента.

Тем не менее, наличие в топливе колчеданных форм железа (пирит, марказит) признается всеми исследователями в качестве главного показателя склонности топлива к образованию железистых отложений. Основным звеном в их развитии являются процессы с участием промежуточного продукта разложения пирита – моносульфида железа, который в сочетании с другими формами железа образует легкоплавкие высокотекучие эвтектические системы. Например, эвтектика FeS-Fe плавится при 980 °C, а FeS-FeO – при 940 °C.

Для углей, содержащих дисульфидные формы железа, характерно образование железистых отложений как на топочных экранах, так и в виде первичных отложений на высокотемпературных конвективных поверхностях нагрева. Особенно в сильной мере проявилось образование железистых отложений при сжигании березовского угля – вплоть до возникновения не удаляемых штатной очисткой монолитов.

Первичные плотные отложения с высоким содержанием сульфата кальция, в отличие от щелочных и железистых, не могут рассматриваться как результат единовременного акта осаждения и закрепления активных частиц, поскольку основным процессом упрочнения этих отложений является сульфатизация. Это – вторичный химический процесс, который занимает определенное время и идет в уже отложившихся частицах и поэтому не может оказывать влияния на механизм осаждения и закрепления частиц. Такими предшествующими этапами могут быть любые взаимодействия поверхности нагрева с запыленным потоком дымовых газов, создающие предоснову для развития сульфатизации закрепившихся частиц, в том числе и рассмотренные выше при образовании двух других типов первичных отложений, но при существенно меньшем содержании щелочных и железистых легкоплавких частиц в потоке.

Для начала сульфатизации достаточно создание тонкого слоя частиц и за счет других явлений. Из них наиболее существенными считаются:

- инерционное столкновение частиц с поверхностью;
- молекулярная и турбулентная диффузия частиц через пограничный слой;
- перемещение частиц под действием температурного градиента в сторону холодной поверхности (термофорез);
- перемещение частиц под действием электростатических сил (электрофорез);
- конденсация и десублимация испарившихся и сублимировавшихся в зоне высоких температур минеральных компонентов.

Перечисленные процессы первоначального взаимодействия золовых частиц с поверхностью нагрева в сильной мере зависят от фракционного состава золы уноса и режимных параметров. В основном эти явления распространяются на мелкие фракции золы, причем в конкретных условиях вероятность переноса частиц к поверхности может определяться как любым из этих факторов, так и их сочетанием. По мере образования на трубе покрывающего слоя движущие силы переноса частиц под действием термофореза и электрофореза ослабевают, поэтому на стадии стабилизировавшихся первичных отложений и при развитии вторичных отложений эти факторы осаждения частиц становятся несущественными.

Кроме осаждения частиц, для развития связывания на основе сульфатизации в потоке необходимо удержание частиц на поверхности. Для наиболее мелких частиц особенно сильное значение имеют межмолекулярные силы притяжения, механическое закрепление в шероховатостях поверхности трубы и напыляемого слоя, слипание с вязкими частицами.

Упрочнение отложений

Основным химическим процессом, приводящим к образованию и упрочнению связанных отложений при сжигании канско-ачинских углей, является взаимодействие оксида кальция, содержащегося в золе, с SO_2 и SO_3 дымовых газов по реакциям:

$$2CaO+2SO_2+O_2 \rightarrow 2CaSO_4; \qquad CaO+SO_3 \rightarrow CaSO_4.$$

Вторую из приведенных реакций обычно считают незначительной, поскольку в дымовых газах содержание SO_3 относительно суммарного содержания оксидов серы очень мало по сравнению с SO_2 и, как правило, находится на уровне 1...2 %. Однако некоторые исследователи указывают на то, что в глубине слоя отложений эта реакция может играть существенную роль благодаря каталитическому влиянию Fe_2O_3 и ферритов кальция на повышение скорости окисления SO_2 до SO_3 [6].

Наиболее быстро сульфатизация отложений развивается за счет реагирования химически несвязанного оксида кальция, т.е. свободной формы CaO. Именно в таком виде содержится большая доля оксида кальция в летучей золе канско-ачинских углей. Кроме того, сульфатизация протекает за счет вовлечения в реагирование с оксидами серы и CaO, связанного химически с компонентами золы. Это было показано как расчетным путем [20, 21], так и

прямыми экспериментами с кальцийсодержащими соединениями [22] и пробами летучей золы из газоходов котлов [23]. При этом происходит разложение кальцийсодержащих соединений под действием SO_2 дымовых газов с последующей сульфатизацией CaO, однако процесс идет для разных соединений с различной скоростью. Наименее устойчивы ферриты кальция и сравнительно устойчивы двухкальциевые силикаты [22].

Наряду с сульфатизацией к механизму связывания отложений, создающему эффект упрочнения, относят процессы спекания и кристаллизации [24, 25]. Начальное взаимодействие и развитие сил сцепления между частицами за счет спекания происходят тем интенсивнее, чем мельче частицы и чем выше температура. Наряду с этим может протекать кристаллизация с образованием новых фаз, которой подвергаются частицы аморфного (стекловидного) вещества с течением времени, а кристаллические новообразования усиливают спекаемость частиц. Поскольку высокой склонностью к агломерации обладают соединения железа, то при высокой концентрации железистых частиц основным процессом связывания отложений выступает спекание.

Заключение

1. Представления о факторах, влияющих на золовое и шлаковое загрязнение тепловоспринимающих поверхностей, базируются на выявленном разнообразии типов натрубных отложений, натурных наблюдениях, теоретическом обосновании и в разной мере подтвержденных гипотезах о механизмах их образования и трансформирования. Определяющая роль при этом отводится золовым и шлаковым частицам в состоянии полного или частичного расплавления, а также частицам золы, способным к реагированию с газовыми компонентами продуктов сгорания.
2. Связанные и связанно-шлаковые отложения в наибольшей мере влияют на экономичность эксплуатации паровых котлов, на готовность к несению нагрузки и надежность работы, так как обладают способностью к интенсивному нарастанию и одновременному самоупрочнению, прогрессирующий характер которых ограничивает возможности эксплуатационных средств очистки поверхностей нагрева.
3. Изменение тепловой эффективности и механизм развития отложения взаимосвязаны, так как термическое сопротивление отложений имеет важное значение для самого процесса золового загрязнения. С ростом температуры на поверхности отложений и приближением ее к показателям плавкости золы интенсифицируется рост их слоя из-за возникновения условий для закрепления частиц с признаками плавления. Увеличение температурного градиента в этом слое усиливает диффузионные процессы, что наряду с исходным составом золы определяет динамику термохимических преобразований отложений. Поэтому слоистая структура, встречающаяся в связанных отложениях, может рассматриваться как результат проявления теплопроводности в механизме их образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Н.В. Рабочие процессы и вопросы усовершенствования конвективных поверхностей котельных агрегатов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 171 с.
2. Эпик И.П. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. – Таллин: ЭГИ, 1961. – 249 с.
3. Шарловская М.С., Ривкин А.С. Влияние минеральной части сибирских углей на загрязнение поверхностей нагрева парогенераторов. – Новосибирск: Наука, 1973. – 242 с.
4. Вдовенко М.И. Минеральная часть энергетических углей. – Алма-Ата: Наука, 1973. – 256 с.
5. Деринг И.С. Поведение минеральной части твердого топлива в парогенераторах. – Красноярск: Изд-во КПИ, 1973. – 215 с.
6. Отс А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей. – М.: Энергия, 1977. – 312 с.
7. Рундыгин Ю.А. Низкотемпературное сжигание сланцев. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 104 с.
8. Залкинд И.Я., Вдовченко В.С., Дик Э.П. Зола и шлаки в котельных топках. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 80 с.
9. Влияние минеральной части энергетических углей на работу котлоагрегатов / М.И. Вдовенко, В.С. Бадакер, Н.Б. Киселев, Л.В. Москаленко. – Алма-Ата: Наука, 1990. – 284 с.
10. Изучение шлакующих свойств золы углей, поступающих на электростанции Западной Сибири и Урала / А.Н. Алехнович, В.В. Богомолов, Э.П. Дик, Н.И. Иванова // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов: Тез. докл. III Всес. конф. Т. 1А. – Таллин: ТПИ, 1980, С. 81–86.
11. Дик Э.П. Влияние минеральной части твердого топлива и методов сжигания на свойства золовых отложений // Минеральная часть топлива и ее роль в работе энергетических устройств: Матер. Всес. научно-техн. совещ. – Алма-Ата: КазНИИЭ, 1971. – С. 8–13.
12. Шарловская М.С., Шугуров В.Ф. О причинах образования золовых отложений при сжигании черемховского угля // Известия СО АН СССР. – 1963. – № 2. – Вып. 1. – С. 33–40.
13. Лебедева М.Ф., Шишкина Л.М., Иванов Ю.Е. Прогноз шлакующей способности некоторых углей вновь разрабатываемых месторождений Дальнего Востока // Минеральная часть топлива и ее роль в работе энергетических устройств: Матер. Всес. научно-техн. совещ. – Алма-Ата: КазНИИЭ, 1971. – С. 15–23.
14. Образование отложений с высокой концентрацией окислов железа на поверхности нагрева парогенераторов / Э.П. Дик, В.Д. Суровицкий, А.Н. Соболева, Ю.Я. Кускова // Теплоэнергетика. – 1977. – № 9. – С. 51–54.
15. Опытное сжигание березовского угля повышенной зольности / Ю.Л. Маршак, А.И. Гончаров, М.Я. Процайло и др. // Теплоэнергетика. – 1978. – № 8. – С. 9–14.
16. Шлакование топочной камеры при сжигании березовского угля / Ю.Л. Маршак, С.Г. Козлов, Э.П. Дик и др. // Теплоэнергетика. – 1980. – № 1. – С. 16–22.
17. Образование отложений на поверхностях нагрева парогенераторов в различных условиях сжигания углей Березовского мес-

торождения / И.К. Лебедев, А.С. Заворин, Е.П. Теплухин, Н.Б. Киселев // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов: Тез. докл. III Всес. конф. Т. 1А. – Таллин: ТПИ, 1980. – С. 69–75.

18. Исследования сжигания малозольного березовского угля в низкотемпературной тангециальной топочной камере / Ю.Л. Маршак, С.И. Сучков, Э.П. Дик и др. // Теплоэнергетика. – 1981. – № 7. – С. 9–14.
19. Состав и шлакующие свойства экибастузского угля / А.Н. Алехнович, В.В. Богомолов. Г.М. Хромых и др. // Теплоэнергетика. – 1983. – № 5. – С. 29–31.
20. Арро Х.Х., Махлапуу А.Я., Ратник В.Э. О роли связанной CaO в процессах образования золовых отложений // Матер. конф. по процессам в минеральной части энергетического топлива. – Таллин: ТПИ, 1969. – С. 51–62.
21. Дик Э.П., Кускова Ю.Я. Термодинамическая вероятность сульфатизации некоторых кальциевых соединений в атмосфере дымовых газов // Матер. конф. по процессам в минеральной части энергетического топлива. – Таллин: ТПИ, 1969. – С. 103–111.
22. Чурсина Н.Я., Михальская Л.О. Сульфатизация золы канско-ачинских углей и отдельных ее компонентов в атмосфере топочного газа // Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. – 1971. – № 7. – С. 43–51.
23. Лебедев И.К., Привалихин Г.К., Федецкий И.И. Некоторые вопросы сульфатизации промышленных проб летучей золы углей Канско-Ачинского бассейна // В сб.: Опыт сжигания и результаты исследования канско-ачинских углей. – Красноярск: Красноярский рабочий, 1970. – С. 165–174.
24. Дик Э.П., Залкинд И.Я., Кускова Ю.Я. Роль фазовых превращений минеральной части топлива в упрочнении золовых отложений // Горение твердого топлива: Матер. Всес. конф. – Новосибирск: Наука, 1969. – С. 488–498.
25. Деринг И.С., Дубровский В.А., Дик Э.П. Спекание различных фракций летучей золы бурых углей // Теплоэнергетика. – 1972. – № 2. – С. 48–50.

УДК 621.396.6